

# 我国深海科技的现实挑战与发展策略研究\*

纪建悦<sup>1,2</sup> 孙浚钊<sup>1</sup> 曹绍朋<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国海洋大学 经济学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋发展研究院, 山东 青岛 266100)

**摘要:**随着陆地资源不断枯竭,蕴藏丰富资源的深海日益成为保障国家资源安全、破解发展瓶颈的新战略空间。深海科技是将潜在资源优势转化为现实生产力的关键。本研究厘清深海科技的概念内涵,结合当前发展实际,指出我国深海科技在技术创新、产业化落地、生态影响、国际治理以及人才供给方面面临的现实挑战。基于上述挑战,从构建自主可控的技术创新体系、打造多链协同的产业生态体系、建立可持续发展的生态治理体系、积极参与构建公平合理的国际治理体系、建设产业导向的人才供给体系等方面提出有针对性的发展策略。

**关键词:**深海科技;技术创新;产业生态;国际治理

**中图分类号:** F74; F124.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-335X(2026)01-0001-09

**DOI:** 10.16497/j.cnki.1672-335X.202601001

## 一、引言

近年来,随着新能源汽车、新一代信息科技和高端装备制造等新兴产业的快速发展,全球对战略性资源的需求不断扩大。然而,长期开采导致陆地资源面临枯竭威胁,开采成本不断攀升,难以持续满足日益增长的经济增长需求。我国作为新兴工业大国,关键资源对外依存度居高不下。这使资源安全成为制约经济社会可持续发展的重要因素。在此背景下,深海所蕴藏的多金属结核、稀土、天然气水合物及生物基因等资源,日益成为保障国家资源自主供给、破解发展瓶颈的战略资源。深海科技是贯通资源勘探、开采和加工全流程的关键环节,能够将深海潜在的资源优势转化为现实发展动力,使深海资源切实服务于国家发展需求。深海科技的发展不仅有助于缓解陆地资源短缺的困境,而且能通过产业化构建完整的产业生态,从而在全球深海竞争中抢占先机,为海洋强国战略奠定坚实的产业基础。因此,发展深海科技、推进深海开发、加快深海科技产业化,既是顺应全球资源竞争格局的必然选择,也是破解资源约束、维护国家安全的战略之举,对塑造未来发展新优势具有深远意义。

深海科技的相关研究伴随国家海洋战略推进与工程技术深化逐步展开,呈现出从资源导向到系统探索的演进逻辑。前期研究聚焦深海资源勘探开发技术,围绕矿产、油气、生物等资源,<sup>[1][2][3]</sup>形成适用不同资源类型的技术应用体系。研究内容涵盖资源分布规律、开采技术可行性及区域开发模式,<sup>[4]</sup>对比深海与陆地资源的价值差异,<sup>[5]</sup>初步构建深海资源的经济评价维度,<sup>[6]</sup>为后续产业化应用奠定基础。该阶段的研究多集中于具体技术环节分析,尚未形成对深海科技内涵的整体性界定。随着深海装备技术的突破,深海开发的理论研究逐渐向产业应用拓展。学界开始关注技术转化效率、利益相关者协调及产

\* 收稿日期:2025-10-28

基金项目:山东省社会科学规划研究项目“深海经济推动山东新质生产力发展研究”(25DJJJ25)

作者简介:纪建悦(1974-),男,山东青岛人,中国海洋大学经济学院教授,中国海洋大学海洋发展研究院研究员,博士生导师,主要从事海洋经济和国民经济研究。

\*\* 通信作者:曹绍朋(1991-),男,山东聊城人,中国海洋大学经济学院讲师,博士,主要从事海洋经济、公司金融、环境经济研究。

产业链协同等问题,<sup>[7][8][9]</sup>分析商业化成败的关键影响因素与政策工具在推动技术攻坚与产业升级中的作用机制。<sup>[10][11][12]</sup>同时,国际深海竞争格局逐步成为研究焦点,相关成果揭示深海开发中的国际博弈本质,<sup>[13]</sup>强调技术优势向规则话语权转化的重要性。<sup>[14]</sup>在此过程中,政策驱动与市场调节的互动关系得到初步探讨,地方实践案例研究、发展策略研究以及产业化探索研究为区域深海产业发展模式提供经验参考。<sup>[15][16][17]</sup>总体来看,当前针对深海科技的研究仍缺乏对我国深海科技概念内涵与发展路径的系统性归纳,仅韩立民等对深海经济发展进行了系统的理论框架研究。<sup>[18]</sup>学界尚未在深海科技领域对其发展过程中的现实挑战和发展策略作出系统性梳理与总结。

当前深海科技的研究呈现出明显的碎片化特征,在概念内涵、现实挑战与发展策略等方面的分析存在理论缺口。现有对于深海科技概念内涵的研究多将深海科技简单地等同于技术装备或资源开发活动,未能充分把握其作为跨学科融合复杂系统的本质属性,也未能从产业发展的角度对其进行分析。此外,针对深海科技的现实挑战和发展策略,现有研究大多聚焦装备制造、资源开发等单一领域,未能从产业化发展视角开展系统性梳理分析。理论研究的滞后与深海科技实践的快速推进形成鲜明反差,凸显了构建系统性分析框架的迫切性。基于上述研究的缺口,本研究对我国深海科技发展的现实挑战和发展策略展开系统性研究,其边际贡献主要体现在以下三方面:其一,在概念内涵上,突破现有研究将深海科技等同于技术装备或资源开发的局限,从多学科交叉视角界定其核心属性,明确地将其界定为融合海洋科学、材料工程、生态保护等领域的复杂系统,并提出深海科技是一个由科学认知到工程技术落地,再到最后形成产业化的综合体系;其二,在现实挑战上,结合我国深海科技发展的现状以及产业化发展前景,从五个维度对深海科技发展过程中存在的问题进行系统梳理,分析我国深海科技产业发展中面临的现实挑战;其三,在发展策略上,从技术、产业、生态、规则、人才五个维度提出系统性协同发展策略,为破解深海科技产业化瓶颈提供指导。

## 二、深海科技的概念内涵

深海科技作为海洋强国战略的重要支撑,其概念内涵随着人类对深海认知的深入和技术的提升而不断丰富。2017年,《全国海洋经济发展“十三五”规划》首次部署深海科技领域相关内容,提出着力提升深海技术装备能力,推动深海科技从战略构想向工程实践落地。<sup>[19]</sup>在此期间,我国在深海科技领域持续突破,向深海科技工程落地的目标稳步推进。随着时间的推移,深海科技从工程实践逐渐向产业化迈进。在2025年《政府工作报告》中首次将深海科技与低空经济、商业航天并列为新兴产业发展重点方向,提出要推动深海科技产业安全健康发展。<sup>[20]</sup>由此可见,对深海科技的认知呈现出从科学认知到工程落地,再到产业化应用的演进过程。基于上述发展脉络,结合深海科技的特定应用场景,本研究将深海科技的概念归纳如下:深海科技是以200米以下深海资源为研究对象,通过多学科融合建立系统性科学认知,突破极端环境技术瓶颈,形成资源开发与生态保护协同的技术体系,实现深海资源可持续开发利用的综合性产业体系。该概念强调,深海科技的本质在于通过系统性技术创新将深海从认知空白区转化为可持续开发利用空间,最终实现科学探索、资源开发利用与生态维护的协同发展。其内涵体系包含三个核心维度:在科学认知维度,构建深海环境与资源的理论基础;在工程技术维度,实现探测、开发与保护的技术突破;在产业应用维度,完成资源价值转化与产业协同发展。

### (一)科学认知维度

将对深海科技的科学认知建立在多学科交叉融合的基础上,旨在通过理论创新实现对深海生态系统的全面理解。通过整合海洋科学、人工智能与材料科学等多学科理论与方法,对深海极端环境特性、地质构造规律、资源分布特征和生态系统运行机制等展开深入研究。这种跨学科研究揭示了深海复杂物理化学环境特性、生态系统运行机制等科学规律,建立对深海资源开发的研究范式,为技术创新提供科学依据和方向指引。科学认知维度使深海从未知领域转化为可量化、可建模的科学空间,为后续工程

技术落地与产业化应用奠定坚实的理论基础,体现了深海科技作为知识创新体系的本质属性。

### (二)工程技术维度

从深海科技的工程技术维度来看,它可以从根本上解决资源开发与环境保护之间的矛盾。该维度以技术创新为基础,通过工程化路径将科学认知转化为可行的技术方案,其核心在于建立深海开发与环境约束之间的动态平衡机制。在工程实践中,依托各种高精尖装备进行深海资源的勘探、开采、运输与处理。在作业过程中,技术创新贯穿全程,既需要突破材料耐压、能源供给等基础技术,又需要创新智能控制、远距离通信传输等系统技术,形成环环相扣的技术链条。值得注意的是,生态环境保护作为深海资源可持续开发的核心约束,其价值通过将生态约束量化为工程技术参数并贯穿技术全周期得以凸显,最终形成开发与保护协同的技术范式。工程技术体系不仅要保障极端环境下的操作可行性,更要通过技术创新的内在调节机制,实现深海开发利用过程中经济性、安全性与可持续性的有机统一,为深海科技产业化发展奠定技术方面的基础。

### (三)产业应用维度

深海科技的产业应用维度本质上是科技创新的价值实现。该维度以工程技术突破为基础,通过产业化机制将技术优势转化为经济效益和社会效益。深海科技产业应用内涵的本质是科技创新与产业发展的深度融合。首先,其包含新兴产业的培育维度,聚焦深海装备制造、资源开发、数据服务等领域,这些领域并非单纯的产业类别,而是科技成果转化为实际价值的实体依托,承载着将技术优势转化为产业竞争力的核心功能;其次,其涵盖完整产业链的构建属性,从技术研发突破到成果中试转化,再到市场落地应用的全体体系,确保创新成果通过深海产业链实现价值增值;最后,其包含制度支撑,聚焦技术标准的制定、知识产权的保护、投融资机制的完善,为价值转化提供稳定环境。

科学认知、工程技术和产业应用这三个维度伴随政策演进相互支撑、逐步发展,共同构成深海科技完整内涵体系(图1)。在政策推动下,以学科交叉融合与深海科学规律为基础的科学认知体系为深海科技工程技术落地筑牢理论根基。在理论创新与技术突破的作用下,深海科技的发展实现资源开发与生态约束动态平衡,逐步向产业化落地方向迈进。深海科技从科学认知到产业化初步形成的过程,通过政策引导与技术创新,使深海科技的内涵不断丰富完善,彰显其作为前沿技术领域的复杂性与系统性。

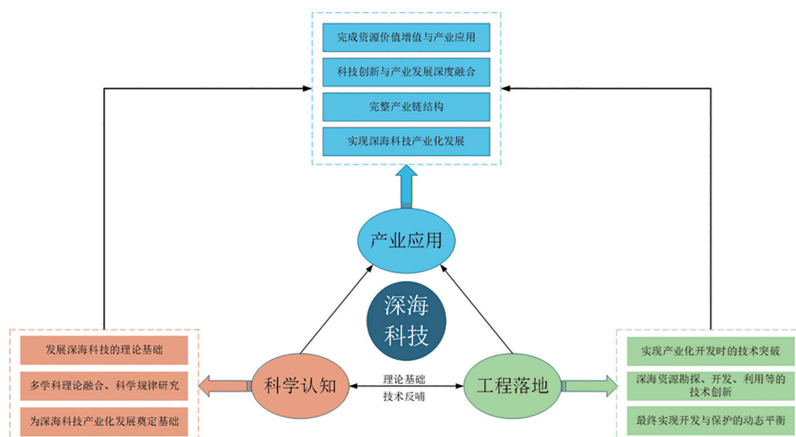


图1 深海科技内涵体系

### 三、我国深海科技发展面临的挑战

当前,与深海科技相关的产业是我国重点布局的战略性新兴产业,其发展水平深刻影响着国家在深海资源开发、海洋主权维护以及前沿科学技术探索等多个关键领域的核心竞争力。然而,深海科技在发展过程中面临技术创新、产业化落地、生态约束、国际治理与人才结构等现实挑战。这些挑战相互叠加、彼此影响,共同构成深海科技产业化发展的系统性障碍。深入剖析这些矛盾的内在机理,不仅有助于从理论层面厘清发展阻滞的根源,而且将为在实践中促进深海资源的可持续开发利用、推动产业体系整体优化提供重要依据。

### (一)技术创新水平不足是深海科技产业化发展的核心挑战

我国深海科技面临技术创新性不足的核心挑战,首先是基础研究创新能力不足。当前对深海极端环境的基础研究尚不充分,我国虽然已经拥有国际一流的深海综合探测平台,具备开展深海综合探测与研究的基础条件,但是深海科学研究尚处于起步阶段,<sup>[21]</sup>难以为后续开展环境适配型技术研发提供有效支撑。深海材料科学的研究存在短板,对在特殊环境下部分深海材料的微观结构变化、性能衰减机制等认知不深,<sup>[22]</sup>直接制约深海勘探、开采等装备的自主研发。此外,对于深海地质演化规律、生物演化周期等掌握不足,难以满足后续生态约束下的深海开发活动。深海基础研究欠缺,使关键技术突破缺乏坚实的理论根基,从源头上影响技术创新的推进。

关键技术依赖进口进一步加剧技术创新性不足的困境。尽管我国已实现“奋斗者号”万米深潜、“开拓二号”采矿业4000米作业深度的里程碑式突破,但深海装备的核心功能实现仍高度依赖进口技术,核心部件如高精度传感器等国产化率仅有23%。<sup>[23][24]</sup>这些核心部件需要满足深海极端环境要求,但部分关键技术被少数发达国家垄断,国产替代产品仍存在差距。这种依赖不仅限制了国产装备性能的进一步提升,而且直接推高了装备制造成本,导致深海作业装备价格居高不下。

自主装备研发滞后是技术创新性不足的集中体现。与发达国家相比,我国在高端海工装备方面仍存在一定差距,深海装备技术还存在体系化不够、全链条设计不足等短板,在深海勘探、大型新型船舶设计等方面有迫切需求。此外,相关研究显示,我国水下无线装备领域因起步较晚,在产品化和成熟度上滞后于发达国家约5年,在传播距离、误码率性能、装备可靠性、产品谱系化等方面落后于国际先进水平。<sup>[25]</sup>

### (二)投入高、风险大是影响深海科技产业化的重要阻碍

投入高与回收期长形成的资金门槛,成为深海科技从技术突破走向产业落地的重要阻碍之一。深海极端环境对装备、系统的特殊要求,使前期投入远超常规产业。例如,深海采矿设备成本很高,更关键的是投资回报周期远长于一般的产业,这种高投入、回报周期长的特性严重削弱资本吸引力。更严峻的是,多金属结核开采等深海科技作业需配套复杂的操作系统,使综合成本进一步攀升,让整体深海科技产业的投资回报体系难以形成。

深海作业的多重风险构成产业化推进的核心阻碍,进一步加剧技术落地的现实困境,使技术转化过程充满显著的不确定性。以深海矿产资源开发为例,国际金属市场价格受全球经济周期、供需格局、地缘政治等多重因素影响波动频繁,而深海资源开发前期需投入巨额资金用于装备研发、勘探作业和平台搭建,一旦市场价格低于开发成本阈值,企业将面临盈利困难甚至亏损风险,这会直接削弱资本投入意愿,导致技术转化缺乏持续资金支持。与此同时,深海开发涵盖油气开采、矿产勘探与科学考察等多元化场景,不同场景的核心需求差异显著:油气开采需侧重高压环境下的长期稳定作业与流体传输效率,矿产勘探开采依赖高效采集、分选与管道提升系统,科学考察则强调高精度探测、原位取样与数据传输能力,通用型装备难以兼顾各类作业的效率与可靠性,专用装备又面临研发周期长、成本高的问题,进一步增加技术标准化与规模化应用的难度,成为产业化落地的重要瓶颈。

### (三)生态约束是深海科技可持续发展的核心边界条件

深海生态保护的刚性约束与产业开发的利益诉求形成尖锐矛盾,根源在于深海生态系统固有的脆弱性。这种特性不仅让其对人类开发活动的耐受度极低,更使得破坏一旦发生便难以逆转。深海作为地球特殊的生态圈层,脆弱性体现在很多方面,如常年处于高压、低温、黑暗的极端环境,生物生长代谢速率极慢,深海冷泉区的珊瑚群落生长周期十分漫长,一旦遭到破坏,自然恢复需要成百上千年,<sup>[26]</sup>远超人类产业开发的周期尺度。同时,深海生态系统结构简单、食物链单一,若开发活动破坏某一关键物种栖息地可能直接导致局部生态链断裂,难以通过人工干预重建。此外,人类对深海生态的探测严重不足,<sup>[27]</sup>大量未知敏感生态区可能隐藏在开发区块内。现有技术难以在开发前将其完全识别,使开采活动极易触发无意识破坏,且后果往往在多年后才会显现。深海生态的脆弱性使深海作业的环境影响被

持续放大。例如,在深海采矿作业中,深海多金属结核开采会增加大量沉积物羽流,<sup>[28]</sup>其携带的重金属会加剧海洋酸化,对深海生态系统造成不可逆影响,但多数企业未将高额的生态修复成本纳入产业成本核算,导致“开发收益私人化、生态成本社会化”的失衡。

产业规范与监管体系的滞后放大了生态风险。国际海底管理局虽制定了勘探规章,但采矿活动的环境标准、监测机制及责任归属仍未明确。目前国际对沉积物羽流的规定仍停留在原则性层面,未明确具体的浓度限值、监测频率,致使各国实际操作缺乏统一标准。这可能导致深海生态因无序开发面临不可逆破坏,同时加剧国际间资源争夺与治理冲突。我国出台的《环境影响评价技术导则·海洋生态环境》为深海采矿项目的环境影响评价提供了基础性的技术框架和法定程序要求。然而,由于深海采矿活动及其环境影响的特殊性、复杂性和高度不确定性,该通用导则可能不足以全面评估和管控其独特的、巨大的环境风险。因此,未来很可能需要在此基础上,制定专门针对深海采矿更为严格和具体的技术指南或补充规定。

#### (四)法律体系滞后与地缘政治博弈是需要重点关注的国际治理问题

我国深海科技的发展正面临国际法律治理体系滞后与地缘政治博弈加剧的双重制约,这为深海科技全球治理体系带来多重挑战。国际海底管理局自1994年成立以来,其关于深海采矿法规谈判持续至今仍未达成共识,环保标准、利益分配及技术转让等条款存在大量的争议点。现有法律未明确深海作业事故的责任归属及赔偿机制,若作业活动导致跨国生态损害,受损国难以通过现行国际法追责。

地缘政治博弈使产业布局进一步复杂化。例如,太平洋克拉里昂-克利珀顿区(C-C区)作为多金属结核资源富集区域,已成为各国竞相争取的战略要地。我国虽在C-C区拥有独立的勘探区块,但欧盟通过“地平线欧洲”计划支持成员国联合开发,加之太平洋岛国的立场分化,加剧国际规则制定的难度。美国为自身利益重新激活《深海海底硬矿资源法》。2025年4月,特朗普签署《释放美国近海关键矿产和资源》行政令,从国家安全和经济利益角度要求加速开发海底矿产,试图绕过国际海底管理局的监管。加拿大公司金属公司(TMC)的美国子公司便据此向海洋和大气管理局提交了两项勘探许可证和全球首个商业开采许可的申请,目标直指C-C区海域。这种无序开采可能会引起资源、生态与规则的失衡。<sup>[29]</sup>无序竞争与规则模糊的现状,对我国深海科技的产业化发展产生直接影响。

#### (五)人才短缺是深海科技发展的重要制约

当前的人才培养模式与深海科技发展的跨学科、产业化特性脱节,相关人才短缺已成为深海科技发展的重要制约。

首先,跨学科培养体系不健全与产教融合不足。深海科技涵盖海洋科学、材料工程、智能控制、生态环境及国际法规等多学科领域,但海洋学科体系学科划分过细、专业壁垒森严、协同育人机制滞后,导致人才知识结构比较单一、跨界整合能力不足、战略前瞻性欠缺。<sup>[30]</sup>同时,人才培养体系与产业需求脱节加剧短缺困境,对深海装备工程化、商业化运营管理等前沿领域的教学内容覆盖不足,致使毕业生难以满足产业对复合型人才的迫切需求,从源头上制约深海科技的发展。

其次,高水平实训平台匮乏导致的实践能力薄弱是人才培养体系的又一短板。深海科技对人才的工程实践与环境适应能力要求极高,然而目前能够模拟深海高压、低温、低能见度等极端环境的实训基地与虚拟仿真平台相对不足,使学生难以获得逼近真实的实践体验。学生参与真实深海勘探、装备研发与生态监测等科研工程项目的机会稀缺,导致其理论知识与复杂工程实践产生脱节。

最后,长效人才激励体系不够完善。现有人才评价与激励体系难以有效支撑深海科技的产业化导向,对技术成果的工程化落地成效、产业化项目贡献及国际规则参与度等关键产业价值指标重视不足。此外,针对掌握核心技能稀缺人才的薪酬体系缺乏市场竞争力,技术入股、收益分享等长期激励手段应用尚不广泛,难以吸引和留住高层次创新型人才,削弱产业创新的内生动力。

#### 四、我国深海科技的发展策略

面对深海科技发展中所呈现的多维度系统性挑战,仅凭单一领域的技术突破难以有效破解当前困局,需要从国家战略层面构建协同整合的系统性发展策略。上述挑战不仅相互交织共同制约我国深海科技向产业化开发阶段的跨越,而且影响海洋强国建设、全球深海治理话语权构建等长远战略目标实现。为此,本研究提出以下发展策略,旨在推动深海科技产业化发展进程,并在全球深海竞争格局中完成从“跟跑”到“领跑”的战略转型。

##### (一)构建自主可控的技术创新体系

为突破深海科技领域的单点技术瓶颈,应着力构建覆盖“基础研究—技术突破—产业应用”全链条的创新生态系统,通过系统性布局破解关键领域的结构性制约问题。

首先,在基础研究层面,应强化多学科交叉融合,聚焦深海极端环境下的根本性科学问题,整合海洋科学、材料工程、人工智能等多领域的科研力量,深入探索耐压材料性能调控、极端环境腐蚀机理等基础理论,构建极端环境模拟研究平台,为技术创新提供理论支撑与实验基础,填补深海基础科学领域的认知空白。在C-C区等重点区域深入研究多金属结核成矿机制与深海生物演化规律,为生态约束下的开发活动提供理论依据。同时,需要建立深海科学数据库共享机制,整合不同海域、不同深度的环境参数与生物特性数据,为基础研究提供数据支撑。

其次,在关键技术攻坚方面,需要构建系统性技术体系并进行前瞻性技术布局。聚焦我国高精度传感器、耐高压动力系统薄弱领域,整合高校、科研院所与企业的产学研力量进行联合攻关,缩小国产产品与进口产品在性能稳定性、使用寿命上的差距,全面提升核心技术自主可控能力。提前布局深海原位探测、水下人工智能等前沿技术,并积极推动前沿技术从实验室走向工程化应用,全面提升核心技术自主可控能力。

最后,成果转化机制的革新是打通创新链条的关键环节。应建立科研机构、中试平台与产业主体的协同创新联盟,完善从实验室成果到产业应用的全流程验证体系,构建自主技术标准体系。通过政策引导与市场激励相结合的方式,设立深海技术产业化专项基金、推行首台(套)装备保险补偿政策,加速技术成果的产业化落地,逐步摆脱对国际技术体系的依赖,推动形成从技术研发到产业应用的完整链条。

##### (二)打造多链协同的产业生态体系

深海科技产业化需要构建产业链、资金链、创新链协同联动的发展模式,通过多维度机制创新破解产业化瓶颈。

首先,在产业链层面,应以“降本增效”为核心,重点推进深海作业系统优化,通过工艺改进将资源回收率提升至商业化水平。同时,应建设上下游技术参数共享平台,依托专业化分工避免重复研发与同质化竞争,化解高投入压力,构建成本可控、运行高效的产业体系。

其次,投融资机制创新是破解资金约束的关键。应构建涵盖政府基金、社会资本、国际资本的多元化资金池,设立深海科技产业基金,采用政府引导与市场化运作并举的模式,对投资回报期较长的项目给予风险补偿和收益共享,吸引耐心资本的投入,缓解深海科技项目的资金压力。此外,应建立风险分散机制,探索设立技术风险补偿资金池与深海作业保险,将难以预估的技术失败风险转化为可量化的财务成本,系统降低投资者面临的高风险压力。

最后,创新与产业深度融合是生态可持续的核心。应推动产学研用协同创新,强化知识产权保护与成果转化机制,加速多金属结核高效提炼等技术的工程化应用,确保创新成果快速转化为现实生产力,加速核心技术创新向产业化应用的转变。更重要的是,需要设计清晰的商业价值实现路径,联动陆上产业需求,快速发展技术门槛相对较低、市场回报更快的下游应用,用其产生的早期现金流为战略性长周期项目持续赋能。通过技术研发突破发展瓶颈,从而促进产业升级,产业升级后产生的市场利润再反哺

于技术研发,最终形成一个动态循环机制,长期保持产业生态的活力。

### (三)建立可持续发展的生态治理体系

深海科技产业的可持续性需要以科学认知为基础、环境监管为抓手,构建系统性治理体系。为实现深海资源开发利用与生态保护之间的动态平衡,有必要构建以产业为导向的系统性治理框架,通过多层次制度设计缓解开发活动与环境保护之间的内在矛盾。

首先,在科学认知层面,应持续加强对深海生态系统、深海地质构造等的基础研究,推动形成常态化的跨国界、跨学科的科研协作机制,整合多方面科研力量,对深海关键生态区域进行系统性勘探与监测,逐步构建起覆盖全球主要深海生态系统的基线数据库,推进生态数据的标准化采集与开放共享。同时,加大对深海生态演化规律的研究投入,开发适用于长周期生态变化的模拟与预测模型,提升对生态系统演变趋势的科学预判能力,从而为环境影响评估提供可靠依据,从源头降低因认知不足导致的生态风险。

其次,全周期环境监管是协调资源开发与生态保护关系的关键环节。应将环境影响评价与管理嵌入项目规划、实施、运营、收尾等全周期各环节,形成覆盖开发全链条的环境管理机制。通过制定统一的环境标准体系,明确各类开发活动的生态准入条件、环境影响阈值及监测要求,构建从前期评估、过程监控到后期修复的闭环管理体系。强化开发主体的生态责任,将生态修复作为项目实施的强制性要求,确保开发行为对生态系统的影响处于可接受范围内,从而实现资源开发与生态保护的协同推进,为产业可持续发展提供制度保障。

### (四)积极参与构建公平合理的国际治理体系

为提升我国在深海科技领域的国际引领能力,需要积极参与构建公平合理的国际治理新秩序,以应对当前深海治理中规则碎片化与地缘政治博弈等挑战。

首先,在规则制定方面,我国应积极参与国际深海治理机制的谈判与完善进程,在维护各国共同利益的同时,促进全球深海治理向更加公正有效的方向发展。同时,加强国内相关法律与国际规则的衔接,增强我国在国际规则建构中的话语权,为我国深海科技的产业化发展创造有利条件。

其次,在合作机制方面,构建以技术与供应链为纽带的战略性协作网络,保障产业化安全。为积极应对地缘政治风险,我国应主动构建多层次的国际合作框架,与发展中国家及新兴经济体建立发展深海科技的合作伙伴关系,通过共享环境数据、联合技术研发、提供能力建设等方式,将我国的科技优势转化为广泛的国际合作基础,维护以国际海底管理局为核心的多边体系,有效反制任何单边行为。同时,通过合作推动构建涵盖资源勘探、冶炼加工的国际合作,提升我国在全球深海产业生态中的嵌入深度和不可替代性,从根本上保障产业化布局的韧性与安全。

最后,在责任机制方面,应积极推动建立全球统一的深海活动责任认定与损害赔偿框架,弥补现有法律体系在执行与责任界定方面的不足。需要明确深海开发活动中开发者、运营者、监管者等不同主体的责任边界与问责标准,制定科学统一的环境损害评估方法与赔偿计算准则,并充分考虑深海生态系统的特殊性与恢复困难,建立公正合理的赔偿额度确定机制。建议设立专门的跨国争议解决机构,为处理跨境生态损害纠纷提供高效的调解与仲裁渠道,确保受损方能够获得及时救济,在制度层面预防“公地悲剧”的发生,保障深海科技在法治轨道上健康发展。

### (五)构建产业导向的人才供给体系

在深海科技产业化进程中,人才供给与产业需求之间的结构性矛盾日益凸显,具体表现为跨学科复合型人才不足、高校人才培养体系脱节等问题。只有从人才培养、实践训练与激励保障三个维度构建系统性的人才供给体系,才能为深海科技产业发展提供持续智力支撑。

首先,构建产业导向的人才培养体系。以产业发展需求为培养目标,构建跨学科融合的深海科技培养模式。推进深海科技交叉学科建设,整合海洋科学、材料学、生态学等几大核心学科,并将其作为培养重点方向;设置涵盖深海装备研发原理、深海作业各项流程、海洋生态环境评估方法等关键领域的课程

体系,弥补海洋科技人才因学科培养模式单一导致的产业运营、风险管控等方面的能力短板。

其次,搭建实践训练平台,强化学生的实操能力和深海作业适应性。依托企业、科研院所与高校的优质资源,共同建设高水平深海科技实训基地,系统整合深海探测装备、虚拟仿真平台与实验模拟装置等教学资源,为学生提供高度贴近工程实际的实践教学环境,促进理论知识与实践技能的深度融合。在此基础上,应建立学生参与科研与工程项目的长效机制,鼓励学生参与深海勘探、装备研发、生态监测等实践项目,通过实践学习积累经验,缩小学术培养与产业需求之间的结构性差距。针对深海作业环境复杂、高风险、高成本的特点,应重点开发先进虚拟仿真训练系统,模拟深海高压、低温与低能见度等极端条件下的设备操作、故障诊断与应急处置流程,以作为实体实训的有效补充,强化人才在复杂工况下的快速响应与问题处置能力。

最后,构建人才激励长效机制。推行技术入股与成果激励等制度,允许核心技术人才以专利技术入股深海科技企业,分享技术产业化后的长期收益,实现人才贡献与回报相对等价的匹配。改革职称评定与晋升机制,打破“唯论文、唯课题”的评价导向,将深海装备工程化落地成效、产业化项目成本控制效率、国际规则参与度等产业贡献指标纳入核心评价维度,为高科技创新型人才成长搭建清晰的职业发展通道。

## 五、结语

深海科技的发展,既是我国突破资源约束、拓展发展空间战略抉择,也是参与全球深海竞争、塑造海洋治理格局的核心依托,对实现海洋强国建设目标与可持续发展具有深远意义。本研究首先介绍深海科技的概念内涵,并围绕深海科技的现实挑战与发展策略展开系统性研究,既为把握其从科学认知到工程落地、再到产业化应用的多维复合属性提供了新角度,也为破解其产业化进程中的系统性难题提供了实践指引。本研究深入剖析我国深海科技发展中面临的挑战,阐明技术创新、产业落地、生态约束、国际治理、人才结构多重挑战的内在机理。在此基础上构建的五大发展策略,为推动深海科技从“技术积累”向“系统领先”、再向产业生态成熟转型提供了可行框架。展望未来,深海科技的发展将进一步向跨学科深度融合、全链条协同增效、全球化治理参与方向演进。我国深海科技产业在深海资源高效开发、生态系统精准保护等领域的应用价值将持续凸显。随着自主创新能力的不断提升、产业生态的日趋完善、国际合作网络的广泛构建,我国深海科技必将在全球深海事业发展中占据关键地位,为保障国家资源安全、提升国际竞争力、构建海洋命运共同体贡献重要力量。

## 参考文献:

- [1] 周平,杨宗喜,郑人瑞,等. 深海矿产资源勘查开发进展、挑战与前景[J]. 国土资源情报,2016,(11):27-32.
- [2] 孙巍. 深海石油工程装备技术发展现状及展望[J]. 中外能源,2012,17(9):9-14.
- [3] 张祖兴,方仕杰.“一带一路”建设中的南海深海渔业资源养护合作[J]. 东南亚研究,2019,(4):105-123,157.
- [4] 李满红,程阳锐,李小艳,等. 日本深海采矿发展现状分析及启示[J]. 矿冶工程,2023,43(4):16-20,25.
- [5] 王春娟,王玺茜,刘大海,等. 基于价格因素的深海富稀土沉积物价值评价——与陆地稀土矿床比较分析[J]. 资源开发与市场,2020,36(10):1074-1079.
- [6] 潘放,金强,郑成荣. 深海多金属结核商业开采经济性分析[J]. 船舶,2024,35(6):136-143.
- [7] 赵业新. 论海上丝绸之路背景下中国与太平洋岛国深海采矿合作[J]. 太平洋学报,2019,27(10):31-46.
- [8] 钟京东. 福建省深海养殖产业高质量发展对策研究[J]. 发展研究,2025,42(4):72-76.
- [9] 张风轩,余静,周玲玲. 博弈视角下深海矿产利益相关者的价格竞争与产研合作:以深海多金属结核为例[J/OL]. 系统管理学报,1-19 [2025-12-12]. <http://link.cnki.net/urlid/31.1977.N.20250526.1747.002>.
- [10] 林家骏,李志文. 深海技术商业化机制初探[J]. 太平洋学报,2018,26(7):35-47.
- [11] 仲伟俊. 新型举国体制的适用领域与运用方式——以深海载人潜水器的开发过程为例[J]. 人民论坛·学术前沿,2023,(1):60-69.
- [12] 刘明明,王震,潘燕妮. 深海油气开发财税支持政策比较研究[J]. 国际经济合作,2014,(2):31-35.

- [13] 李雪威,李佳兴. 国际社会深海采矿反对之声的演变、根源与应对[J]. 太平洋学报, 2024, 32(8): 76-89.
- [14] 冯妮,杨建民. 全球深海矿产资源开发进展与启示——以装备技术为核心[J]. 太平洋学报, 2024, 32(8): 62-75.
- [15] 蒋永建,王鑫,范海玲,等. 山东省深海开发未来产业发展初探[J]. 中国工程咨询, 2024, (12): 49-52.
- [16] 黄博,孙晓春,李友训,等. 山东深海矿产资源勘探开发产业发展与对策[J]. 海洋经济, 2023, 13(3): 63-67.
- [17] 王圣,郝艳萍,任肖嫦. 山东深海战略性资源产业化开发研究[J]. 海洋开发与管理, 2012, 29(9): 116-119.
- [18] 韩立民,梁铄. 深海经济:建设基础、面临的问题及发展路径[J]. 东南学术, 2025, (4): 138-150, 248.
- [19] 国家发展改革委,国家海洋局. 全国海洋经济发展“十三五”规划[EB]. [https://www.mnr.gov.cn/dt/hy/201705/t20170515\\_2333192.html](https://www.mnr.gov.cn/dt/hy/201705/t20170515_2333192.html), 2017-05-15/2025-10-02.
- [20] 李强. 政府工作报告[M]. 北京:人民出版社, 2025.
- [21] 李超伦,李富超. 深海极端环境与生命过程研究现状与对策[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(12): 1302-1307.
- [22] 蒋鹏,王启,张斌斌,等. 深海装备耐压结构用钛合金材料应用研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(6): 95-101.
- [23] 梁健臻,冯景春,张卉,等. 深海科学实验装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 23-37.
- [24] 陈旭光,寇海磊,牛小东,等. 深海水下技术装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 1-14.
- [25] 刘新宇,周恒,葛锡云,等. 水下无线通信装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 38-49.
- [26] 张文静. 冷水珊瑚林为什么这样热? [N]. 中国科学报, 2018-11-02(01).
- [27] 张鑫,李超伦,李连福. 深海极端环境原位探测技术研究现状与对策[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 932-938.
- [28] Gazis I Z, de Stigter H, Mohrmann J, et al. Monitoring benthic plumes, sediment redeposition and seafloor imprints caused by deep-sea polymetallic nodule mining[J]. Nature Communications, 2025, 16: 1229.
- [29] 复旦大学美国研究中心. 美国观察|美国深海矿产开采政策的“制度性绕行”及其国际后果[EB]. <https://iddi.fudan.edu.cn/63/40/c21253a746304/page.htm>, 2025-09-08/2025-11-02.
- [30] 李华军,刘勇. 向海图强:构建面向未来的大海洋学科体系[N]. 光明日报, 2025-09-02 (15).

## Practical Challenges and Strategic Pathways for Deep-Sea Science and Technology in China

Ji Jianyue<sup>1,2</sup> Sun Junzhao<sup>1</sup> Cao Shaopeng<sup>1</sup>

(1. School of Economics, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Institute of Marine Development, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** As terrestrial resources continue to decline, the resource-rich deep sea has increasingly become a strategic frontier for safeguarding national resource security and addressing developmental bottlenecks. Deep-sea science and technology serve as the key to transforming potential resource advantages into real productive capacity. This paper first outlines the conceptual foundations of deep-sea science and technology. It then identifies the major practical challenges China currently faces, including constraints in technological innovation, limited industrialization capacity, ecological risks, complexities in international governance, and insufficient talent supply. In response, the paper proposes targeted development strategies aimed at building an independent and controllable technological innovation system, fostering a multi-chain and collaborative industrial ecosystem, establishing a sustainable ecological governance framework, actively contributing to a fair and equitable international governance regime, and constructing an industry-oriented talent cultivation and supply system.

**Key words:** deep-sea technology; technological innovation; industrial ecosystem; international governance

责任编辑:王明舜